بررسی رفتار فشاری نانوماده‌ی مرکب مستحکم با زمینه‌ی آلومینیم تقویت شده با نانوذرات آلومیناید منیزیم*

اشکان ذوالریاستین[۱]　　　رسول آذری خسروشاهی[۲]

چکیده

در این پژوهش، نوع جدیدی از نانوماده‌ی مرکب با زمینه‌ی آلومینیم تقویت شده با نانوذرات با ترکیب پیچیده‌ی بین فلزی β-Al_3Mg_2 به‌روش متالورژی پودر تهیه شد. نخست و به‌منظور تولید نانو ذرات، پودر شمش پیش آلیاژ شده‌ی Al-40 wt.%Mg به‌مدّت زمان ۱۰۰ساعت آسیاکاری مکانیکی شد و نانوذرات به‌دست آمده با اندازه‌ی حدود ۲۵ نانومتر و مقادیر مختلف پودر آلومینیم، به‌مدّت زمان ۱۰ ساعت آسیا شدند و در ادامه، برای تهیه‌ی نمونه‌های نانوماده‌ی مرکب، در دمای $۴۰۰\,^{\circ}C$ و با فشار ۶۰۰ MPa فشرده (پرس‌کاری) شدند. نتایج چگالی سنجی، کاهش وزن نمونه‌های نانوماده‌ی مرکب به‌همراه کاهش چگالی نسبی را نشان دادند و این به سبک‌تر شدن نانوماده‌ی مرکب با افزودن نانوذرات سبک آلومیناید منیزیم نسبت داده شد. نتایج بررسی‌های مکانیکی، افزایش چشم‌گیر و پیوسته‌ی سختی و استحکام را با افزایش میزان نانوذرات نشان دادند. با افزودن ۲۰ wt.% تقویت کننده، سختی و استحکام تسلیم به‌ترتیب از حدود ۳۵ برینل و ۸۷MPa برای آلومینیم خالص به حدود ۱۷۶ برینل و ۶۲۵MPa افزایش یافت، ولی با توجه به کاهش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با افزودن فاز تقویت کننده، میزان ۱۰ درصد وزنی تقویت کننده به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: نانوماده‌ی مرکب، نانوذرات، آلومیناید منیزیم، آسیاکاری مکانیکی.

Compressive Behavior of a High-Strength Al-Based Nanocomposite Reinforced with Magnesium Aluminide Nanoparticles

A. Zolriasatein　　　R. Azari Khosroshahi

Abstract

In this work, a new aluminum matrix nanocomposite reinforced with beta-magnesium aluminide nanoparticles was produced by powder metallurgy technique. The prealloyed Al-40 wt.% Mg intermetallic ingot was milled for 100 hours to synthesize β-Al_3Mg_2 nanoparticles with the average size of 25 nm. Different amounts of nanoparticles were added to Al matrix powder and the mixture was then milled for 10 hours. Al/β-Al_3Mg_2 nanocomposite samples were prepared by hot pressing of the composite powders in a uniaxial die at 400 °C under the constant pressure of 600 MPa for 2 hours. The results of density measurements revealed that both the density and relative density of nanocomposite samples decrease due to the usage of superlight β-Al_3Mg_2 reinforcement. Mechanical properties of the nanocomposites were significantly improved with increasing the reinforcement content. Increasing the amount of β-Al_3Mg_2 nanoparticles continuously improved the hardness and yield strength of composites from 35 BHN and 87 MPa for pure aluminum to approximately 176 BHN and 625 MPa for the sample containing 20 wt.% β-Al_3Mg_2 nanoparticles, respectively. However, the addition of more reinforcement particles up to 20 wt.% resulted in a decrease in the ultimate strain of the samples, and hence, 10 wt.% nanoparticles was considered to be the optimum content of the reinforcement component.

Keywords Nanocomposite, Nanoparticle, Magnesium Aluminide, Mechanical milling.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۱/۸/۲۰ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۲/۷/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱)دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی مواد

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی مواد

مقدمه

محققین در تلاشند تا به‌منظور کاهش میزان مصرف سوخت و جلوگیری از گسترش آلودگی‌ها، وسایل نقلیه‌ی سبک‌تری تولید کنند. برای این‌منظور لازم است تا به‌جای مواد متداول، از مواد جدید و سبک‌تر و با کارآیی بهتر استفاده کرد [1,2]. در این میان، مواد مرکب زمینه فلزی (metal matrix composites) و به‌خصوص زمینه آلومینیمی آن، بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. این مواد مرکب به‌دلیل داشتن خواص مهمی از جمله چگالی کم، استحکام بالا و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، مورد توجه قرار گرفته‌اند [3,4].

نقش ذرّات تقویت کننده در خواص مواد مرکب اهمیّت بسیاری دارد. شکل، اندازه، مورفولوژی و ترکیب شیمیایی این ذرّات تأثیر زیادی بر روی خواص مواد مرکب دارند. در میان تقویت کننده‌های ناپیوسته، تقویت کننده‌های ذرّه‌ای به‌دلیل روش‌های تولید ارزان‌تر و ساده‌تر و خواص هم‌سان‌گرد، در مقایسه با تقویت کننده‌های پیوسته توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده‌اند [4]. مواد مرکب با تقویت کننده‌های ذرّه‌ای را می‌توان به‌خوبی با روش‌های متالورژی پودر تولید کرد. مزیت روش‌های پودری در مقایسه با روش‌های ذوبی را می‌توان به امکان کنترل ریزساختار، کسر حجمی، اندازه و مورفولوژی فازهای زمینه و تقویت کننده مربوط دانست. از طرف دیگر، به‌دلیل پایین بودن دمای کارکرد آن‌ها، از وقوع واکنش‌های ناخواسته بین زمینه و تقویت کننده در فصل مشترک آن‌ها که منجر به افت خواص مکانیکی می‌شود، جلوگیری به‌عمل می‌آید [5,6].

از مواد مختلفی می‌توان به عنوان فاز تقویت کننده استفاده کرد. تاکنون بیش‌تر از تقویت کننده‌های سرامیکی متداول مانند کاربیدها (TiC,B_4C)، [۷و۸]، نیتریدها (AlN)، [9]، و اکسیدهای فلزی (Al_2O_3)، [10]، با اندازه‌های نانومتری و یا میکرومتری استفاده شده است. افزون بر این، اخیراً از تقویت کننده‌های غیرمتداول مانند نانولوله‌ها و نانوساختارهای کربنی، [11]، فلزات بی‌شکل و شبه‌بلورها، [6]، استفاده شده است. به‌تازگی مبحث جدیدی در علم مهندسی مواد مطرح شده است که به بررسی ساختارهای پیچیده‌ی بلورین می‌پردازد.

ترکیبات پیچیده‌ی فلزی (Complex metallic alloys) (CMAs) نوعی از ترکیبات بین فلزی هستند که در ساختار بلوری خود دارای سلول‌های واحد بسیار بزرگی مشتمل بر هزاران اتم هستند. از این‌رو، دارای شبکه‌های بلوری بسیار بزرگ با پارامتر شبکه‌ای در حدود نانومتر می‌باشند [12].

یکی از کاربردهای نوینی که می‌توان برای ترکیبات فوق‌الذکر در نظر گرفت، استفاده از آن‌ها به‌عنوان فاز تقویت کننده در مواد مرکب و نانومواد مرکب است. برخورداری از خواص مهمی نظیر نسبت بالای استحکام به وزن، مقاومت به اکسایش و استحکام در دمای بالا، آن‌ها را به جای‌گزینی مناسب برای سرامیک‌های قدیمی به‌عنوان فاز تقویت کننده در نانومواد مرکب تبدیل کرده است. به‌این ترتیب می‌توان مواد مرکب سبک‌تر، مستحکم‌تر و با کارایی بهتر تولید کرد که در صنایع گوناگونِ حمل و نقل و هوافضا کاربرد دارند [13]. در میان ترکیبات CMA، فاز بتای آلومیناید منیزیم (β-Al_3Mg_2) با ترکیب شیمیایی در محدوده‌ی ۳۶/۱ تا ۳۷/۸ درصد وزنی منیزیم (مطابق با شکل(۱- الف))، و دارا بودن ۱۱۶۸ اتم در هر سلول واحد و پارامتر شبکه در حدود ۲/۸ نانومتر، یکی از بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین ترکیبات CMA می‌باشد (شکل ۱. ب) [14,15].

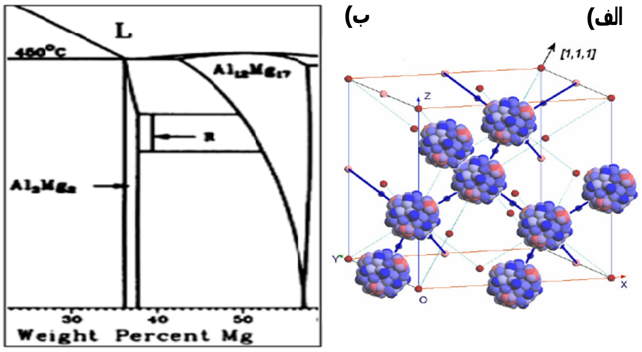
توجه به روش ساخت، ساختار، خواص و کاربرد این ترکیب بیش‌تر از سایر ترکیبات CMA بوده است و نتایج باارزشی برای آن به‌دست آمده است [15]. این ترکیب دارای خواصی است که آن را به بهترین گزینه برای استفاده به‌عنوان تقویت کننده در

نانومواد مرکب تبدیل ساخته است. از جملـه‌ی ایـن خـواص مـی‌تـوان بـه چگـالی پـایین (در حـدود ۲/۲۵ g/cm^3) و استحکام در دمای بـالا (۳۰۰ MPa در دمای ۵۷۳ K) [13,17] اشاره کرد.

پس از تحقیقات اسکودینو و همکارانش بر روی ماده‌ی مرکـب $Al/\beta\text{-}Al_3Mg_2$ [13]، نانومـاده‌ی مرکـب زمینه آلومینیمی با نانوذرات $\beta\text{-}Al_3Mg_2$ بـرای نخسـتین بار به‌روش آلیاژسازی مکانیکی و پرس گرم تهیـه شـد [18]. هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر میزان فاز تقویت کننده بر چگـالی، سـختی و اسـتحکام فشـاری نانومـاده‌ی مرکـب بـا زمینـه‌ی آلـومینیم کـه بـه‌روش متالورژی پودر، آسیاکاری مکانیکی و پرس گـرم تهیـه شده است، می‌باشد.

روش تحقیق

در این پژوهش، نخست بـه سـاخت شمشـی از CMA از طریـق ذوبـی و آلیاژسـازی بـا ترکیـب Al-40wt%Mg، بر اساس نمودار فازی شکل (۱- ب) و با احتساب ۲ درصد اتلاف منیزیم با وجود انجام عملیات در محیط گاز آرگون، پرداخته شد. در ادامه، شـمش‌هـا خرد و سرند شدند تا پودر اولیّه‌ی میکرونی از ترکیـب مـورد نظـر تهیـه شـود. سـپس، نـانوذرات بـا ترکیـب پیچیده‌ی $\beta\text{-}Al_3Mg_2$ بـه‌روش آسـیاکاری مکـانیکی بـا شرایط ذکر شده در جدول۱، تولید شد تا در مرحلـه‌ی ساخت نانوماده‌ی مرکب، پودر آلومینیم بـا درصـدهای وزنی مختلف (۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) به زمینه اضافه شود.



شکل ۱. الف) ساختار خوشه‌ای اتمی در شبکه‌ی بلوری ترکیب $\beta\text{-}Al_3Mg_2$ [۱۵]، ب) بخشی از نمودار فازی تعادلی Al-Mg [۱۶].

جدول ۱. شرایط آسیاکاری برای ساخت نانوپودر از پودر اولیّه‌ی پیش آلیاژ شده با ترکیب پیچیده‌ی $\beta\text{-}Al_3Mg_2$

مواد اولیّه‌ی ورودی به آسیا	پودر پیش آلیاژ شده با ترکیب $Al_{60}Mg_{40}$ با اندازه ذرات ۲۵۰ µm
نوع آسیا	آسیا گلوله‌ای سایشی
زمان آسیاکاری	۱۰۰ h
سرعت گردش آسیا	۲۷۰ RPM
محیط آسیا	گاز آرگون با فشار ۱ bar
نسبت وزن گلوله به پودر	۱۲ به ۱
عامل کنترل فرایند	اسید استئاریک (۲wt.%)
دمای آسیاکاری	کنترل شده با سیستم آب‌گرد

شرایط در نظر گرفته شده در آسیاکاری مخلوط نانومادهی مرکب، در جدول (۲) آورده شده است. در این میان، بررسیهای فازی و ریزساختاری بر روی نانوذرات تولید شده با فرایند آسیاکاری مکانیکی، بهوسیلهی روش پراش اشعهی ایکس (XRD) و میکروسکپ الکترونی عبوری (TEM) انجام شدند. در ادامه، بهمنظور تولید نمونههای نانومادهی مرکب، مخلوط پودر تحت فرایند فشردن (پرسکاری) گرم در دمای ۴۰۰ °C و فشار ۶۰۰MPa بهمدّت زمان ۲ ساعت قرار گرفت. در نهایت، چگالی و خواص مکانیکی از جمله سختی و ویژگیهای فشاری نمونههای نانومادهی مرکبِ تولید شده، اندازهگیری شدند. چگالی به دو روش هندسی و ارشمیدس اندازهگیری شد. از آزمون سختی سنجی نوع برینل با قطر ساچمهی فرورونده برابر با ۲/۵ mm و نیروی ۳۰ kg استفاده شد. بهمنظور انجام آزمون فشار، نمونههایی با نسبت طول به قطر (L/D) برابر با ۱/۴ (قطر ۱۰ mm و طول ۱۴ mm) از نمونههای پرس گرم شده با عملیات تراشکاری ساخته شد. از دستگاه آزمون کشش/فشار با ظرفیّت ۷ تن و سرعت حرکت فک ۰/۲ mm/min استفاده شد.

جدول ۲ شرایط آسیاکاری برای ساخت مخلوط پودر نانومادهی مرکب Al/ β-Al_3Mg_2

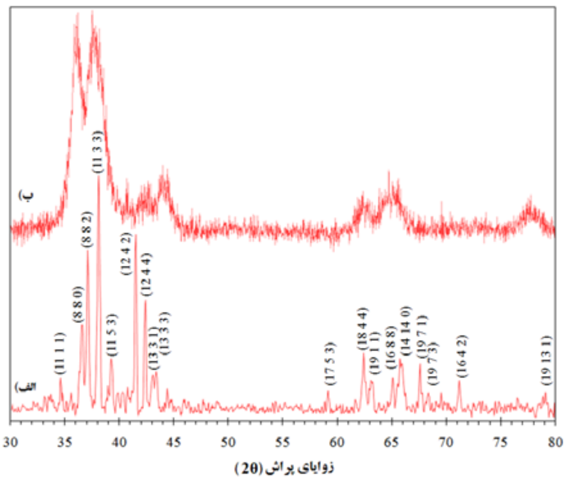
مواد اولیّهی ورودی به آسیا	پودر آلومینیم خالص (۹۹.۹٪، ۱۵۰µm) نانوپودر β-Al_3Mg_2 (۲۷ nm)
نوع آسیا	آسیای گلولهای سیارهای
زمان آسیاکاری	۱۰ h
سرعت گردش آسیا	۳۰۰ RPM
محیط آسیا	گاز آرگون با فشار ۱ bar
نسبت وزن گلوله به پودر	۱۰ به ۱
عامل کنترل فرایند	اسید استاریک (۱.۵ wt.%)
دمای آسیاکاری	متغیّر

نتایج و بحث

در این بخش، نخست به مشخصهیابی نانوذرات ساخته شده که بهعنوان تقویت کننده در نانومادهی مرکب زمینه آلومینیمی بهکار رفته است، پرداخته میشود و در ادامه، نمونههای نانومادهی مرکب از دیدگاههای چگالی، سختی و خواص فشاری مورد بررسی قرار میگیرند.

مشخصهیابی نانوذرات β-Al_3Mg_2

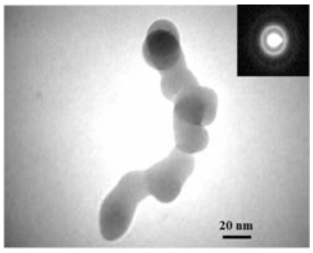
در شکل(۲- الف)، الگوی پراش اشعهی ایکس از پودر اولیّهی ترکیب Al-40wt%Mg دیده میشود. همانطور که در تصویر XRD مشاهده میشود، تنها پیکهای مربوط به ترکیب β-Al_3Mg_2 وجود دارند. در شکل(۲- ب)، محصول فرایند آسیاکاری مکانیکی بر روی پودر اولیّه بهمدّت زمان ۱۰۰ ساعت، نشان داده شده است.



شکل ۲ الگوی پراش اشعهی ایکس، الف) پودر اولیّهی β-Al_3Mg_2، ب) پودر آسیاکاری شدهی β-Al_3Mg_2 بهمدّت زمان ۱۰۰ ساعت

همانگونه که مشاهده میشود، با انجام عملیّات آسیاکاری مکانیکی، پیکهای الگوی پراش اشعهی ایکس بهشدّت پهن شدهاند، شدّت تمامی پیکها کاهش یافتهاند و پیکهایی با شدّت کمتر حذف

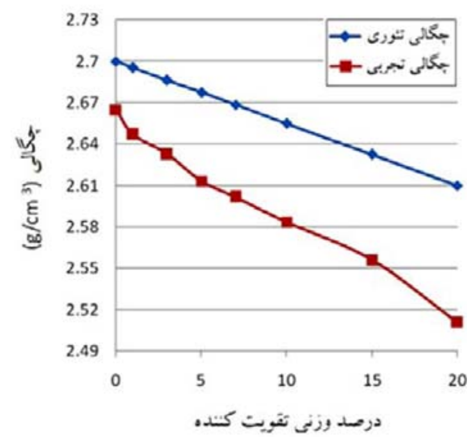
شده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش اندازه‌ی بلورها تا مقادیر نانومتری است. اندازه‌ی بلورهای ترکیب β-Al_3Mg_2 با استفاده از روش ویلیامسون- هال [7]، در حدود ۲۱ nm محاسبه شد. در شکل (۳)، تصویر TEM از نانوذرات حاصل با اندازه‌ی حدود ۲۵nm به‌شکل کروی دیده می‌شود.



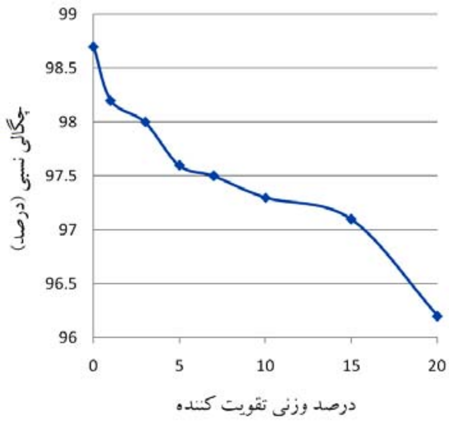
شکل ۳ تصویر TEM از نانوذرات β-Al_3Mg_2

بررسی چگالی

یکی از ویژگی‌های تقویت کننده‌ی β-Al_3Mg_2، چگالی کم‌تر آن (۲/۲۵ g/cm^3) نسبت به زمینه‌ی آلومینیم (۲/۷۳ g/cm^3) است و این منجر به کاهش وزن نمونه‌های نانومادهٔ مرکب با افزایش درصد وزنی آن می‌شود. چگالی نمونه‌های نانومادهٔ مرکب فشرده شده‌ی گرم به‌روش ارشمیدس محاسبه شد تا اثر میزان فاز تقویت کننده بر چگالی و فشردگی آن‌ها بررسی شود. تغییرات چگالی تئوری، عملی در شکل (٤) و تغییرات چگالی نسبی بر حسب درصد وزنی تقویت کننده در نمونه‌ها، در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ٤ مقادیر چگالی تئوری و تجربی نمونه‌های نانومادهٔ مرکب فشرده شده‌ی گرم بر حسب درصد وزنی فاز تقویت کننده

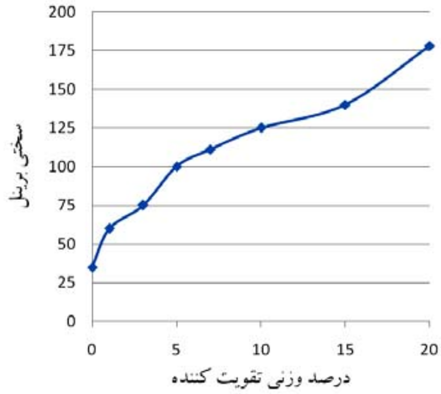


شکل ۵ چگالی نسبی نمونه‌های نانومادهٔ مرکب فشرده شده‌ی گرم بر حسب درصد وزنی فاز تقویت کننده

افزایش درصد تقویت کننده منجر به کاهش میزان فشردگی نانومادهٔ مرکب به‌ازای فشار ثابت در فرایند فشردن گرم شده است. این کاهش چگالی نسبی را می‌توان به کاهش قابلیّت فشردگی پودر با در نظر گرفتن فشار ثابت در فشردن گرم مربوط دانست. استحکام مخلوط پودر با افزایش میزان فاز تقویت کننده افزایش می‌یابد. سطح ویژه‌ی مخلوط پودر نیز با افزایش میزان نانوذرات افزایش می‌یابد و این منجر به افزایش تخلخل موجود در نانومادهٔ مرکب می‌شود. از سوی دیگر، آغشته شدن سطح پودر زمینه‌ی آلومینیمی به این نانوذرات، از رخداد پدیده‌ی جوش سرد حین آسیاکاری جلوگیری می‌کند.

بررسی سختی

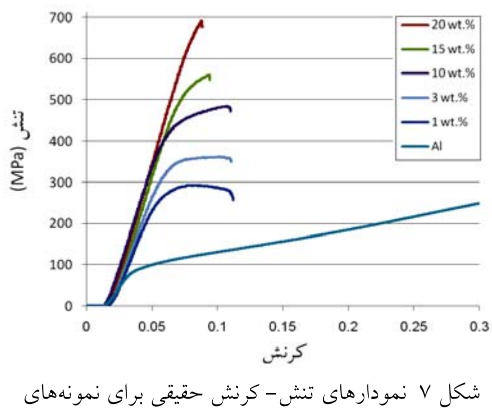
در شکل (٦)، تأثیر افزایش میزان تقویت کننده بر سختی نمونه‌های نانومادهٔ مرکب دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی با افزایش درصد وزنی تقویت کننده به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، به‌طوری که از مقدار میانگین ۳۵ برینل برای پودر آلومینیم خالص بدون تقویت کننده‌ی β-Al_3Mg_2 تا حدود ۱۷٦ برینل برای نمونه‌ی محتوی ۲۰ درصد تقویت کننده افزایش یافته است.



شکل ٦ تأثیر افزایش درصد وزنی فاز تقویت کننده بر سختی نمونه‌های نانوماده‌ی مرکب

بررسی استحکام فشاری

در شکل (٧)، نتایج آزمون‌های فشار برای نمونه‌های نانوماده‌ی مرکب به‌صورت نمودارهای تنش- کرنش حقیقی ارائه شده است. در جدول (٣)، مقادیر استخراج شده از نتایج آزمون فشار آورده شده‌اند. روند افزایشی استحکام تسلیم و استحکام فشاری با افزایش درصد وزنی فاز تقویت کننده به‌خوبی دیده می‌شود. از طرف دیگر، افزوده شدن نانوذرات β-Al_3Mg_2 منجر به تردی و کاهش کرنش نهایی شده است. این کاهش به‌ازای مقادیر بیش از ١٠ درصد وزنی بسیار بیش‌تر است. سازوکار استحکام بخشی در این نانوماده‌ی مرکب، تشکیل حلقه‌های نابجایی اُرُوان می‌باشد. پس از عبور نابجایی، حلقه‌ی نابجایی در اطراف ذره‌ی تقویت کننده باقی می‌ماند و این منجر به افزایش استحکام می‌شود.



شکل ٧ نمودارهای تنش- کرنش حقیقی برای نمونه‌های نانوماده‌ی مرکب با درصدهای وزنی مختلف فاز تقویت کننده

جدول ٣ نتایج آزمون فشار بر روی نمونه‌های نانوماده‌ی مرکب فشرده شده‌ی گرم با مقادیر مختلف فاز تقویت کننده

(wt.%)	σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ε_f
٠	٨٧	١٠٤	٠/٨
١	٢٤٤	٢٩٥	٠/١١٢
٣	٣١٠	٣٥٥	٠/١١٠٥
١٠	٤٢٠	٤٧٥	٠/١١٠١
١٥	٤٧٠	٥٦٠	٠/٠٩٤
٢٠	٦٢٥	٦٨٥	٠/٠٨٨

افزایش کسر حجمی فاز تقویت کننده از یک سو، با کاهش فاصله‌ی میان نانوذرات تقویت کننده (٨) منجر به افزایش استحکام با ممانعت از حرکت نابجایی‌ها می‌شود. به‌این ترتیب، تنش لازم برای حرکت نابجایی‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که دیده می‌شود، وجود نانوذرات باعث افزایش چشم‌گیر کارسختی نمونه‌ها شده است. کاهش انعطاف‌پذیری نانوماده‌ی مرکب حاوی مقادیر بالای نانوذرات را می‌توان به افزایش بیش از حد تخلخل با افزایش فاز تقویت کننده مربوط دانست، چرا که میزان بالای تخلخل در نمونه‌ها می‌تواند منجر به کاهش چقرمگی شود. از سوی دیگر، با افزایش بیش از حد میزان نانوذرات، احتمال خوشه‌ای شدن نانوذرات درون زمینه بیش‌تر می‌شود و این می‌تواند باعث افت خواص مکانیکی نانوماده‌ی مرکب شود.

نتیجه‌گیری

١- در فرایند آسیاکاری مکانیکی پودر اولیّه‌ی شمش پیش آلیاژ شده، نانوذرات β-Al_3Mg_2 شبه کروی با اندازه‌ی میانگین ٢٥ نانومتر را می‌توان پس از ١٠٠ ساعت آسیاکاری با سرعت ٢٧٠ دور در دقیقه و نسبت وزن گلوله به پودر ١٢ به ١، سنتز کرد.

٢- تولید نانوماده‌ی مرکب Al-β-Al_3Mg_2 با خواص

مکانیکی مطلوب با آلیاژسازی مکانیکی و فشردن (پرس‌کاری) گرم امکان‌پذیر است. با افزودن تقویت کننده می‌توان سختی نمونه‌های نانومادهٔی مرکب زمینه آلومینیمی از حدود ۳۵ برینل برای آلومینیم خالص به حدود ۱۷٦ برینل افزایش داد.

۳- خواص مکانیکی مادهٔی مرکب تحت تنش‌های فشاری مانند تنش تسلیم و تنش فشاری، با افزایش میزان فاز تقویت کننده افزایش یافت. تنش تسلیم از حدود ۸۷ MPa برای آلومینیم خالص تا حدود ٦۲۵ MPa برای مادهٔی مرکب Al- wt.% β-Al_3Mg_2 افزایش یافت، امّا در مقابل، از میزان کرنش نهایی، به‌خصوص برای مقادیر بیش از ۱۰ درصد وزنی فاز تقویت کننده، کاسته شد که این نشان‌دهندهٔی ترد بودن نانومادهٔی مرکب است.

٤- چگالی نمونه‌های نانومادهٔی مرکب به‌تدریج با افزایش درصد وزنی نانوذرات تقویت کنندهٔی β-Al_3Mg_2 کاهش یافت. از سوی دیگر، با افزایش میزان این فاز، به‌ویژه در مقادیر بالاتر از ۱۰ درصد وزنی، میزان تخلخل و حفره‌های درون زمینه در نتیجهٔی کاهش قابلیّت فشردگی پودر افزایش و چگالی نسبی کاهش یافت.

مراجع

1. Cole, G. S., Sherman AM. "Light weight materials for automotive applications". Materials Characterization, Vol. 35, Issue 1, pp. 3-9, (1995).
2. Harris, B., Engineering composite materials. Second Edition; IOM communications editors, pp. 20-27, (1999).
3. Miracle, D. B., Metal matrix composites – From science to technological significance. Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 2526–2540, (2005).
4. Clyne, T. W. and Withers, P. J., An introduction to metal matrix composites. Cambridge: Cambridge University Press; (1993).
5. Slipenyuk, A., Kuprin, V., Milman, Y., Goncharuk, V. and Eckert, J., Properties of P/M processed particle reinforced metal matrix composites specified by reinforcement concentration and matrix-to-reinforcement particle size ratio. Acta Materialia, Vol. 54, pp. 157–166, (2006).
6. Scudino, S., Liu, G., Prashanth, K. G., Bartusch, B., Surreddi, K. B, Murty, B. S. and Eckert, J., Mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with Zr-based glassy particles produced by powder metallurgy. Acta Mater, Vol. 57, pp. 2029–2039, (2009).
7. Khakbiz, M. and Akhlaghi, F., Synthesis and structural characterization of Al–B4C nanocomposite powders by mechanical alloying. J Alloy Compd, Vol. 479, pp. 334–341, (2009).
8. Nemati, N., Khosroshahi, R., Emamy, M. and Zolriasatein, A., Investigation of microstructure, hardness and wear properties of Al-4.5wt.%Cu-TiC nanocomposites produced by mechanical milling. J Mater Des, Vol., 32, pp. 3718–3729, (2011).
9. Liu, Y. Q., Conga, H. T., Wang, W., Sun, C. H. and Cheng, H. M., AlN nanoparticle-reinforced nanocrystalline Al matrix composites: Fabrication and mechanical properties. Mater Sci Eng A, Vol.

505, pp. 151–156, (2009).

10. Poirier, D., Drew, R. A. L., Trudeau M. L. and Gauvina R. Fabrication and properties of mechanically milled alumina/aluminum Nanocomposites, Mater Sci Eng A, Vol. 527, pp.7605–7614, (2010).
11. Perez-Bustamante, R., Estrada-Guel, I., Antunez-Flores, W., Miki-Yoshida, M., Ferreira, P. J. and Martınez-Sanchez, R., Novel Al-matrix nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes, J Alloy Compd, Vol. 450, pp. 323–326, (2008).
12. Urban, K. and Feuerbacher, M., Structurally complex alloy phases, J Non-Cryst Solids, Vol. 334&335, pp. 143–150, (2004).
13. Scudino, S., Liu, G., Sakaliyska, M., Surreddi, K.B. and Eckert, J., Powder metallurgy of Al-based metal matrix composites reinforced with β-Al_3Mg_2 intermetallic particles: Analysis and modeling of mechanical properties, Acta Mater, Vol. 57, pp. 4529–4538, (2009).
14. Chwa1ek, M. L., Balanetskyy, S., Thomas, C., Roitsch, S. and Feuerbacher, M., Single-crystal growth of the complex metallic alloy phase β-Al-Mg, Intermetallics, Vol. 15, pp. 1678-1685, (2007).
15. Sikora, W., Malinowski, J., Kuna, A. and Pytlik, L., Symmetry analysis in the investigation of clusters in complex metallic alloys, J Phys doi:10.1088/1742-6596/104/1/012023.
16. Murray, J.,L., Al-Mg (aluminium magnesium). In: Nayeb-Hashemi, A. A. and Clark, J. B., editors. Phase diagrams of binary magnesium alloys. Metals Park, Ohio: ASM International, pp. 17-34, (1988).
17. Roitsch, S., Heggen, M., Lipinska-Chwa1ek, M. and Feuerbacher, M., Single-crystal plasticity of the complex metallic alloy phase β-Al-Mg, Intermetallics,Vol. 15, pp. 833-837, (2007).

۱۸. ذوالریاستین، ا.، آذری خسروشاهی، ر. و امامی، م.، ساخت نانوکامپوزیت‌های مستحکم و سبک زمینه آلومینیومی با نانوذرات تقویت-کننده بین‌فلزی β-Al_3Mg_2 به روش آلیاژسازی مکانیکی وپرس گرم، ثبت اختراع با شماره ثبت:۷۱٤۲۷، (۱۳۹۰).